

**Егоров Андрей Михайлович**

**МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАНОКЛАССА**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(технические системы и связь)

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Самара - 2022

Работа выполнена на межвузовской кафедре космических исследований в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет).

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор Белоконов Игорь Витальевич.

**Официальные оппоненты:**

**Клюшников Валерий Юрьевич**, доктор технических наук, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), главный учёный секретарь, главный научный сотрудник;

**Кулаков Александр Юрьевич**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), старший научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Акционерное общество «Российские космические системы» (АО «РКС»), г. Москва.

Защита состоится 14 сентября 2022 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.215.07, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте: [https://ssau.ru/resources/dis\\_protection/egorov](https://ssau.ru/resources/dis_protection/egorov).

Автореферат разослан «10» июня 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Белоконов  
Игорь Витальевич

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы.

В настоящее время наблюдается нарастающая тенденция использования в космических исследованиях малоразмерных космических аппаратов (КА), к которым относятся наноспутники (НС) стандарта CubeSat.

Такие спутники приобрели популярность благодаря тому, что их создание не требует значительных финансовых и временных затрат, однако позволяет решить много полезных задач, в частности провести лётные испытания миниатюрных датчиков, элементов бортовых систем в условиях космического пространства прежде, чем применять их в дорогостоящих космических миссиях.

Создание НС малыми компаниями, научными и образовательными организациями привело к активному развитию рынка **коммерческих комплектующих** (отдельных бортовых систем), в том числе выполненных на компонентной базе общего назначения (электрорадиоизделия, как правило, не обладают повышенной стойкостью в условиях факторов космического пространства), далее по тексту – коммерческие комплектующие. Использование **модульного принципа** построения НС из коммерческих комплектующих позволяет значительно сократить время создания КА, снизить финансовые затраты.

В составе НС можно выделить полезную нагрузку, предназначенную для решения целевой научной задачи, и совокупность обеспечивающих систем, необходимых для поддержания энергобаланса, ориентации, управления НС. Далее в работе рассматриваются проблемы, связанные с работой обеспечивающих функциональных систем, совокупность которых обозначена как **наноспутниковая платформа (НСП)**.

Анализ выполнения целевых задач для реализованных миссий НС показывает высокий процент аварийных ситуаций, не связанных со средствами выведения, а обусловленных отказами функциональных систем НСП. Большое количество неудач заставляет разработчиков искать пути повышения отказоустойчивости НСП.

Традиционно устойчивость функционирования КА к возможным отказам обуславливается свойством надёжности и предполагает дублирование отдельных бортовых подсистем. Однако для НС данный подход, как правило, не применяется в виду ограничений по массе, габаритам и вычислительным возможностям, а также из-за отсутствия показателей надёжности коммерческих комплектующих в условиях факторов космического пространства.

Возможность использования функциональной избыточности, присутствующей обычно в составе коммерческих комплектующих (датчиков, измерительных средств, контроллеров, модулей памяти и т.п., далее – **элементы НСП**) позволяет использовать её для парирования последствий аварийных ситуаций. При этом возможна реконфигурация схемы информационно-функционального взаимодействия элементов НСП, изменение алгоритмов функционирования, при допустимом снижении качества решения обеспечивающих задач НСП. Реконфигурация производится с применением **байпасов** – резервных путей для обеспечения функционирования системы при наступлении нештатного состояния.

Реконфигурация позволяет обеспечить живучесть НСП как свойство сохранять выполнение важных функций в условиях возникновения отказов. В условиях коротких сеансов связи оперативная реконфигурация функциональной схемы НСП по командам наземного комплекса управления (НКУ) практически не производится или осуществляется с большим опозданием, что может привести к негативным результатам. Необходимо обеспечивать возможность реконфигурации в реальном режиме времени в

зависимости от условий полёта. Включение в состав НСП специализированного алгоритмического или аппаратного блока позволит управлять существующей функциональной избыточностью с целью выполнения целевой миссии НС с максимально возможной эффективностью и повысит его живучесть.

Таким образом, проблему разработки математической модели, методик и алгоритмов обеспечения живучести НС, используемых как на этапе его проектирования, так и на этапе операционного управления, следует считать актуальной.

#### **Степень разработанности темы.**

Предварительный анализ существующих подходов к повышению уровня живучести и автономности проектируемых КА, а также повышению эффективности их функционирования при помощи реконфигурации бортовой системы, показал, что вопросы применения современных методов управления реконфигурацией применительно к НС с учётом их особенностей были недостаточно исследованы.

В рамках работ Ахметова Р.Н., Соллогуба А.В., Макарова В.П. подробно рассматривается процесс функционирования КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при возникновении аномальных ситуаций (АС) на этапе орбитального полёта. Большое внимание сосредоточено на основных принципах работы бортовой системы управления живучестью КА в АС, диагностике системы при возникновении АС, методам восстановления штатного функционирования КА. Предложен комплексный инструментарий (аппаратные, программные модули контроля, применение структурных и функциональных резервов, безопасные режимы функционирования) для технологии полётного реинжиниринга КА ДЗЗ. Фундаментом данной технологии является таблица с информацией об АС, предназначенная для управления бортовыми ресурсами в условиях временных ограничений. В то же время, проблеме реконфигурации бортовых систем НС, осуществляемой в автоматическом режиме без привлечения средств НКУ, уделено мало внимания.

В работах Кулакова А.Ю., Павлова А.Н. уделяется значительное внимание модели реконфигурации системы управления движением (СУД) КА. При этом реконфигурация рассматривается как операции по изменению режима ориентации КА с изменением состава бортовой аппаратуры, применяемой в текущей работе СУД. Представлен метод и алгоритм выбора способа реконфигурации по критерию минимального расхода ресурса бортовой аппаратуры. Проблеме парирования отказов других обеспечивающих функциональных систем (электропитания, связи и пр.) уделено мало внимания.

В работах Додонова А.Г., Ландэ Д.В. рассматривается структурная живучесть как возможность реконфигурации системы при непредвиденных воздействиях. При этом выделяется важность создания структуры, обеспечивающей выполнение критического подмножества функций для достижения цели функционирования системы. В работе не рассматриваются средства обеспечения живучести, не приводятся критерии оценки живучести, которые можно применить для КА.

Кроме вышеупомянутых, в задачах управления структурно-сложными объектами наиболее значимые результаты в исследовании свойств надёжности, безопасности, живучести объектов, а также в исследовании вопросов структурного управления были получены большим количеством отдельных авторов: Беляева Ю.К., Половко А.М., Ушакова И.А. (теория надёжности систем), Рябинина И.А. (логико-вероятностное исчисление), Можаяева А.С. (общий логико-вероятностный метод), Юсупова Р.М. (информационная безопасность), Харитоновна В.А., Черкесова Г.Н. (эффективность функционирования систем), Стекольников Ю.И., Додонова А.Г. (функциональная и структурная живучесть информационных систем), Тарасова А.А. (функциональная реконфигурация).

Для КА характерно выполнение нескольких функций в рамках решения целевой задачи: приём команд и передача ТМИ, электропитание, стабилизация и ориентация. Каждая из этих функций выполняется с участием совокупности элементов НСП, которые имеют тесную взаимосвязь. Применительно к НСП, реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления информационно-функциональными связями для парирования отказов её элементов и подсистем (классическая реконфигурация), но и как технологию рационального перераспределения бортовых ресурсов с целью повышения живучести, сохранения возможности выполнения целевых задач КА. При этом важными становятся задачи автоматического проведения реконфигурации.

Во множестве работ зарубежных авторов (М. Cho, Н. Masui, М. Langer, G. Manyak), связанных с обеспечением живучести информационных систем и НС, рассматриваются различные способы парирования возникающих отказов и управления избыточностью элементов НСП с целью сохранения работоспособности НС. Количественная оценка живучести не обсуждается, что не позволяет оценить качество предлагаемых способов обеспечения живучести.

Таким образом, не рассматривались вопросы, связанные с количественной оценкой живучести НС на этапах проектирования и орбитального полёта, не разработана математическая модель оценки и методики обеспечения живучести НС, спроектированного по модульному принципу из коммерческих комплектующих.

В связи с этим в диссертационной работе рассматриваются разработка и использование математической модели количественной оценки живучести НС как сложной системы, обладающей набором структурно и информационно связанных элементов.

Выполнен анализ подходов к построению НСП из коммерческих комплектующих. Разработана методика выбора состава бортовых средств для обеспечения заданной живучести на раннем этапе проектирования НСП, а также в процессе орбитального полёта, алгоритм управления живучестью НСП во время орбитального полёта.

Исследование иллюстрировалось на примере НС формата CubeSat 3U, совершающего как ориентированный, так и неориентированный полёт. Разработанные методики применимы к малоразмерным КА, создание которых подразумевает использование набора типовых бортовых средств (коммерческих комплектующих общего назначения).

**Целью работы** является обеспечение заданного уровня живучести наноспутниковой платформы на этапе проектирования и при проведении лётно-космического эксперимента.

Для достижения цели определены следующие **задачи работы**:

1. Разработка теоретико-множественной модели НСП, собранной по модульному принципу из коммерческих комплектующих, выявление функциональных систем НСП, отказ которых чаще всего является причиной нештатного функционирования.
2. Разработка математической модели количественной оценки живучести НСП.
3. Разработка методики выбора состава НСП, обладающей заданной живучестью, на раннем этапе проектирования.
4. Разработка методики реконфигурации функциональной схемы НСП (управления живучестью), позволяющей достичь максимально возможной эффективности работы НСП в условиях возникновения отказов на борту на этапе орбитального полёта.
5. Разработка алгоритма оптимальной реконфигурации функциональной схемы НСП на этапе орбитального полёта с целью управления её живучестью.

**Методы исследования.** Методы системного анализа, теоретические методы исследования систем управления, методы теории множеств, теории случайных величин и случайных процессов, методы алгебры логики, методы статистического анализа динамических систем.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Предложен подход к обеспечению живучести НСП, используемый на этапах проектирования и лётного эксперимента, новизна которого состоит в расчете функциональной избыточности, образованной в результате модульной сборки НСП из коммерческих комплектующих общего назначения.

2. Разработана математическая модель количественной оценки живучести НСП, отличающаяся от существующих тем, что учитывает эффективность функционирования НС при решении обеспечиваемых задач.

3. Разработана методика выбора состава НСП, обладающей заданной живучестью, на раннем этапе проектирования, отличающаяся тем, что состав НСП выбирается по минимаксному критерию, а живучесть оценивается на каждой итерации процесса оптимизации.

4. Разработана методика реконфигурации функциональной схемы НСП для обеспечения максимально возможной эффективности её работы в условиях возникновения отказа на этапе орбитального полёта, отличающаяся тем, что реализует эмуляцию функций посредством выбора оптимального функционального соответствия (байпаса).

5. Предложен алгоритм оптимальной реконфигурации функциональной схемы НСП с заданным объёмом функциональной избыточности с целью управления живучестью НС в процессе операционной деятельности.

**Достоверность результатов** обеспечивается обоснованностью принятых допущений в математических моделях; применением известных численных методов при проведении вычислительных экспериментов с математическими моделями; согласованностью результатов, полученных по аналитическим моделям и с помощью статистического моделирования.

**Практическая значимость.** Полученные результаты обосновывают целесообразность использования методик и алгоритмов на раннем этапе проектирования НС, а также в процессе орбитального полёта, что позволяет обеспечить его живучесть и увеличить срок эффективного функционирования.

**Реализация результатов работы.** Теоретические и практические результаты диссертационной работы использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выполненных на межвузовской кафедре космических исследований и в научно-исследовательской лаборатории (НИЛ-102) «Перспективные фундаментальные и прикладные космические исследования на базе наноспутников» Самарского университета, финансируемых из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России (проект 0777-2020-0018).

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались на 14 всероссийских и международных конференциях, в том числе на Всероссийском семинаре по управлению движением и навигации летательных аппаратов (г. Самара, 2014, 2016 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники (Козловские чтения)» (г. Самара, 2015, 2017, 2019 г.), Российском симпозиуме по наноспутникам с международным участием «RusNanoSat» (г. Самара, 2015, 2017, 2019 г.), IX Всероссийской научно-технической конференции

«Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (г. Москва, 2018 г.).

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в трёх изданиях, определённых Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации, одна статья опубликована в издании, индексируемом Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, вычисляющей количественную оценку живучести наноспутника.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Концептуальная теоретико-множественная модель НСП, собранной по модульному принципу из коммерческих комплектующих общего назначения.

2. Математическая модель оценки живучести НСП, учитывающая эффективность функционирования НСП с использованием различных совокупностей байпасов.

3. Методика выбора (структурно-параметрического синтеза) состава НСП, обладающей заданной живучестью, на раннем этапе проектирования.

4. Методика реконфигурации функциональной схемы НСП для обеспечения максимально возможной эффективности работы НСП в условиях возникновения отказа путём эмуляции отказавших функций.

5. Алгоритм оптимальной реконфигурации функциональной схемы НСП с заданным объёмом функциональной избыточности с целью управления живучестью НСП в процессе операционной деятельности.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 76 наименований и 4 приложений. Общий объём диссертации составляет 154 страницы.

**Содержание работы**

Во **введении** приводится характеристика решаемой задачи, обосновывается актуальность темы, формулируется цель диссертации. Отмечены новизна и практическое значение работы, даны сведения о публикациях и апробациях работы. Приведён обзор работ, посвящённых повышению отказоустойчивости бортовых средств малоразмерных космических аппаратов, разработке НС.

В **первой главе** приводится концептуальная теоретико-множественная модель устойчивости функционирования НСП как сложной системы, выполняющей определённый набор функций в рамках решения целевой задачи. Формулируется математическая модель количественной оценки живучести НСП.

НС как космический аппарат представляет собой техническое устройство, обладает системными признаками. При рассмотрении набора задач, возлагаемых на НС, выделяются целевая задача и  $i=1...N$  обеспечивающих задач.

Целевая задача, как правило, является уникальной и требует использования специально разработанного оборудования. В работе рассматриваются проблемы, связанные с работой обеспечивающих подсистем НС, которые в совокупности формируют платформу для проведения космических исследований (рисунок 1).

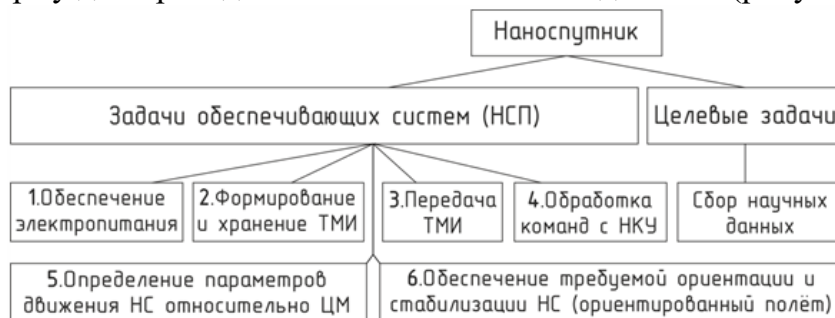


Рисунок 1 – Функции НС в рамках миссии

Живучесть рассматривается как сложное свойство системы «наноспутник», и, согласно принципам системного анализа, также подлежит декомпозиции.

Традиционно проектирование сложных систем, к которым относятся КА, производится с опорой на положения теории надёжности. Под надёжностью понимается комплексное свойство, состоящее в способности системы выполнять функцию в заданных условиях и при наличии необходимых ресурсов, а также влияющие на это свойства безотказности, ремонтпригодности. Обеспечение надёжности требует описание реакций на возможные отказы.

Ограниченные вычислительные и энергетические возможности НС делают такой подход не эффективным. КА нанокласса при модульном проектировании обычно разрабатываются с применением электрорадиоизделий общего назначения, не имеющих количественных оценок показателей надёжности в условиях факторов космического пространства. Эти особенности порождают необходимость обеспечивать живучесть КА.

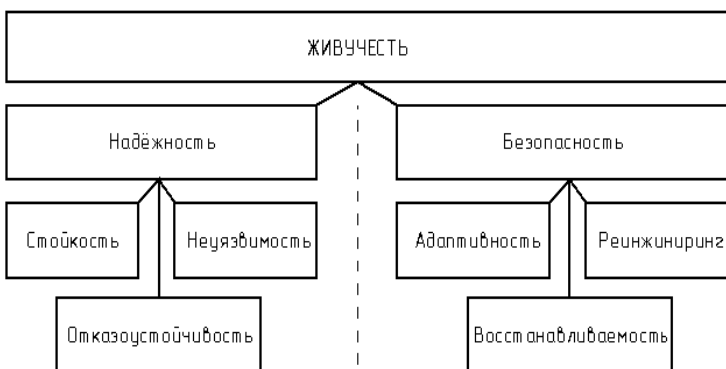


Рисунок 2 – Декомпозиция свойства «живучесть»

Под термином живучесть в данной работе понимается **свойство НС адаптироваться и сохранять способность выполнять целевую задачу с возможной потерей качества** при возникновении отказов в элементах бортовой системы.

Обеспечение живучести рассматривается в работе как обеспечение устойчивости функционирования НСП при отказах бортовой аппаратуры. Для формализации понятия устойчивости функционирования НСП описывается в виде сложной системы, где каждая задача, как правило, решается отдельной функциональной системой. Множество  $S = \{s\}$  описывает **физические элементы НСП**,  $F = \{f\}$  – множество реализуемых ими **алгоритмов**, каждому элементу множества  $s \in S$  соответствует подмножество элементов  $F_s \subset F$ . Исключение элемента  $s$  из множества  $S$  неизбежно приводит к исключению подмножества  $F_s$  из  $F$ .

С элементами булеана  $\Pi_S$  отождествляются технические состояния аппаратно-программных средств, каждое из которых является причиной изменений в функционировании НСП, а элементы булеана  $\Pi_F$  – следствиями. Для исследования устойчивости функционирования НСП используется отображение:  $\Gamma(\Pi_S) = \Pi_F$ .

Областью (условием) устойчивости функционирования НСП относительно области допустимых следствий  $\Pi_F' \subset \Pi_F$  является предельная область допустимых причин  $\Pi_S' \subset \Pi_S$ , для которой справедлив предикат:

$$(\Gamma(\Pi_S') = \Pi_F') \& (\forall (P_s \in \Pi_S) \notin \Pi_S') \rightarrow (\Gamma(P_s \cup \Pi_S') \supset \Pi_F'), \quad (1)$$

где  $P_s \in \Pi_S$  – произвольное штатное состояние НСП.

Задача исследования возможностей повышения живучести НС сводится к задаче исследования возможностей расширения области устойчивости функционирования НСП. При этом **работоспособность НСП** описывается матрицей отказов  $M = \{m_{ij}\}$ , элемент



которой  $m_{ij} = 0$ , если отказ элемента НСП  $s_j$  не влияет на реализацию алгоритма  $f_i$ , и  $m_{ij} = 1$ , если отказ элемента НСП  $s_j$  приводит к нарушению алгоритма  $f_i$ .

Свойство «живучесть» может быть количественно описано различными способами. Например, при статистическом методе, живучесть определяется следующим образом:

$$G = \sum_{i=1}^N k_i \left( 1 - \frac{N_{KFi}}{N_{KF}} \right) / \sum_{i=1}^N k_i. \quad (2)$$

где  $k_i$  - весовой коэффициент, определяемый методом относительной важности,  $N_{KFi}$  - число отказов элементов НСП, приводящих к нарушению выполнения  $i$  задачи,  $N_{KF}$  - общее число отказов,  $N$  - количество обеспечивающих задач НСП.

При расчете живучести данным методом определяется **критичность элементов** как количество отказов элемента НСП, приводящих к нарушению выполнения задач:

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^N N_{KFi}}{N_j \cdot N_{KF}}, m_{ij} = 1, \quad (3)$$

где  $N_j$  - количество функций НСП, в реализации которых задействован элемент  $s_j$ .

Статистический метод имеет недостатки: при нарушении выполнения одной из задач живучесть не равна нулю, учитывается только полный отказ элемента без возможного ухудшения качества его работы. В диссертационной работе предложена математическая модель, допускающая ухудшение качества работы элементов НСП.

При разработке математической модели для количественной оценки живучести НСП приняты следующие допущения и ограничения.

1) Учитываются основные характеристики элементов НСП (энергопотребление, класс точности и пр.), однако не учитывается режим работы отдельных элементов НСП.

2) Формируемая математическая модель оценки живучести НС учитывает состав НСП и является актуальной до наступления первого отказа, после возникновения отказа модель оценки живучести корректируется.

3) Случаи одновременного отказа нескольких элементов НСП не рассматриваются.

Оценка живучести НСП  $G$  осуществляется путём анализа эффективности выполнения всех  $i=1...N$  задач в рамках космической миссии при различных возможных состояниях НСП.

Для решения каждой  $i$  задачи используется определённый набор элементов НСП, каждый из которых характеризуется показателем эффективности применения данного элемента при решении задачи  $\Phi_{ij}$ . Тогда показатель эффективности решения задачи представляется в виде  $\Phi_i = f(\Phi_{ij}, j=1..M_i)$ , где  $M_i$  - количество элементов НСП, используемых для решения  $i$  задачи.

Для каждого элемента НСП в модели задаётся перечень функций, для решения которых он может быть использован, а также рассчитывается **показатель эффективности** применения данного элемента НСП:

$$\Phi_{ij} = k_{ij} \cdot \frac{q_{ij}}{W_{ij} \cdot m_{ij} \cdot v_{ij}}, \quad (4)$$

где  $q_{ij}$  - показатель качества работы элемента НСП  $s_{ij}$  при выполнении заданной  $i$ -ой функции (точность измерения, скорость вычисления и т.д.);  $W_{ij}$ ,  $m_{ij}$ ,  $v_{ij}$  - соответственно, потребляемая электрическая мощность, масса, занимаемый объём элемента  $s_{ij}$  НСП;  $k_{ij}$  - коэффициент нормирования.

Выполнение всех обеспечивающих задач (рисунок 1) является необходимым условием реализации миссии НС. **Эффективность функционирования** НСП  $E(T_{AC})$  для времени активного существования  $T_{AC}$  определяется суммой произведения показателей эффективности  $\Phi_i$  выполнения задач и вероятности  $P_{P_s}(T_{AC})$  нахождения системы в рассматриваемом состоянии для всех возможных совокупностей исправных элементов:

$$E(T_{AC}) = \sum_{P_s \in \Pi_s} \left( P_{P_s}(T_{AC}) \cdot \prod_{i=1}^N \Phi_i \right). \quad (5)$$

В работе предложено использование пошагового нормирования коэффициентов, участвующих в выражении расчета показателей эффективности (4) с учётом функционально-информационных связей элементов НСП.

В качестве показателя количественного измерения живучести  $G(T_{AC})$  в работе **предложено использовать отношение** эффективности функционирования  $E(T_{AC})$ , сохраняющейся у НСП после фиксированной совокупности отказов, к начальной эффективности функционирования НСП  $E(0)$  до возникновения отказов:

$$G(T_{AC}) = \frac{E(T_{AC})}{E(0)}. \quad (6)$$

Описанная математическая модель позволяет получить количественную оценку живучести НСП на этапе раннего проектирования **в диапазоне значений от 0 до 1**. При возникновении отказов в элементах НСП и использовании байпасов показатель эффективности функционирования и живучесть НС снижаются.

Для расчета живучести на этапе орбитального полета выражение показателя эффективности применения элементов НСП должно быть скорректировано:

$$\Phi_{ij}^* = k_{ij} \cdot \frac{q_{ij}}{W_{ij}}. \quad (7)$$

Во **второй главе** рассматриваются особенности элементов НСП, даётся их общая характеристика, проводится анализ рынка коммерческих комплектующих. Формулируется задача структурно-параметрического синтеза состава НСП, обладающей заданной живучестью. Предлагается методика выбора состава НСП путём усложнения базовой НСП с использованием минимаксного критерия.

Построение НСП с использованием коммерческих комплектующих связано с выбором их совокупности из предложенного на рынке ассортимента: солнечные панели, исполнительные устройства, антенно-фидерные устройства и устройство их раскрытия, платы системы электропитания, связи, ориентации и стабилизации.

Для выполнения расчёта количественного показателя живучести в работе приведены характеристики наиболее часто применяемых коммерческих комплектующих. В ряде случаев такие элементы НСП не имеют достаточной лётной статистики и их количественные показатели надёжности не приводятся, однако надёжность элемента НСП можно рассчитать, зная перечень электрорадиоизделий.

Проведен анализ целевых задач для реализованных миссий НС, с учетом статистики отказов функциональных систем НС, приведённой в работах М. Langer «Reliability of CubeSats – Statistical Data...», Е. Kulu «CubeSats ... Survey of Missions», базе данных [www.nanosats.eu](http://www.nanosats.eu). В диссертационной работе построены **аналитические модели** вероятности безотказной работы отдельных функциональных систем НСП путём аппроксимации существующих статистических данных

$$P(T_{AC}) = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{T_{AC}^{C_3}}{C_2}\right), \quad (8)$$

где  $C_1$  - константа, определяет вероятность возникновения отказа в момент отделения от РН;  $C_2, C_3$  - константы, определяют скорость деградации элементов НСП при орбитальном полёте.

На рисунке 3 приведены графические иллюстрации построенных аналитических моделей

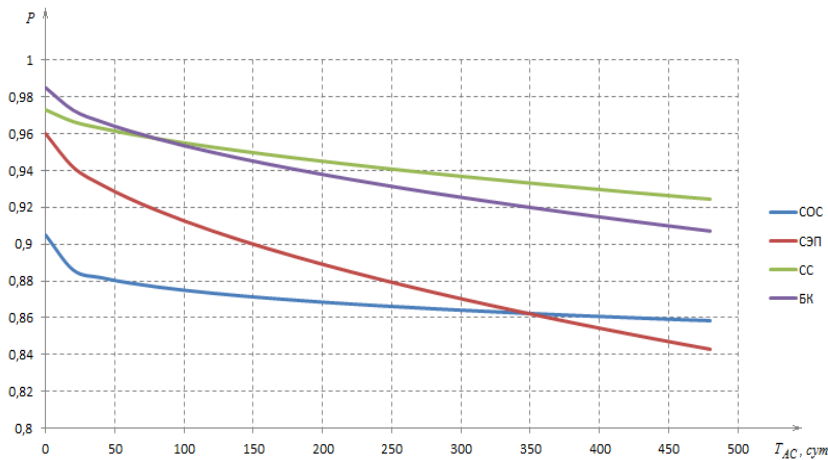


Рисунок 3 – Зависимость вероятности безотказной работы функциональных систем от времени активного существования в сутках, где СОС – система ориентации и стабилизации, СЭП – система электропитания, СС – система связи, БК – бортовой компьютер

При выборе (структурно-параметрическом синтезе) состава НСП необходимо обеспечить устойчивость её функционирования. При отсутствии различного рода избыточности (базовая НСП) причинно-следственная пара  $(S, F)$  находится в состоянии неустойчивого равновесия. Введение аппаратной и алгоритмической избыточности за счет применения коммерческих комплектующих приводит к расширению области допустимых следствий (функциональной избыточности) за счёт изменения информационно-функциональных связей НСП.

При проектировании НС одним из целевых показателей, приведённых в техническом задании, должно быть требуемое значение показателя живучести. Данный уровень живучести, помимо специальных алгоритмов работы бортового компьютера, обеспечивается выбираемой совокупностью элементов НСП.

**Задача синтеза состава НСП** сформулирована следующим образом: требуется определить набор бортовых средств (элементов) НСП, который одновременно позволит выполнить набор  $i=1...N$  задач НСП (рисунок 1) и будет обеспечивать заданную живучесть НСП  $G_p$  на заданном времени активного существования  $T_{AC}$ .

Класс КА, а также попутный способ его выведения на орбиту, конфигурация пускового контейнера накладывают ограничения на массу и габариты разрабатываемого НСП.

Из возможных подходов к проектированию НСП наиболее эффективным с точки зрения времени и стоимости разработки является принцип выбора состава НСП путём добавления элементов в структуру базовой НСП с учетом ограничений (по массе  $m$ , габаритам  $v$ , стоимости  $c$ ), для достижения требуемой живучести  $G_p$ . Для случая НС стандарта CubeSat справедлива следующая математическая формулировка задачи синтеза состава НСП (8).

$$G(T_{AC}) = \frac{E(T_{AC})}{E(0)} \geq G_p(T_{AC}) \quad (9)$$

$$\sum_S m_j \leq m_{MAX}$$

$$\sum_S v_j \leq v_{MAX}$$

$$\sum_S c_j \rightarrow \min$$

Принимается допущение, что мощность

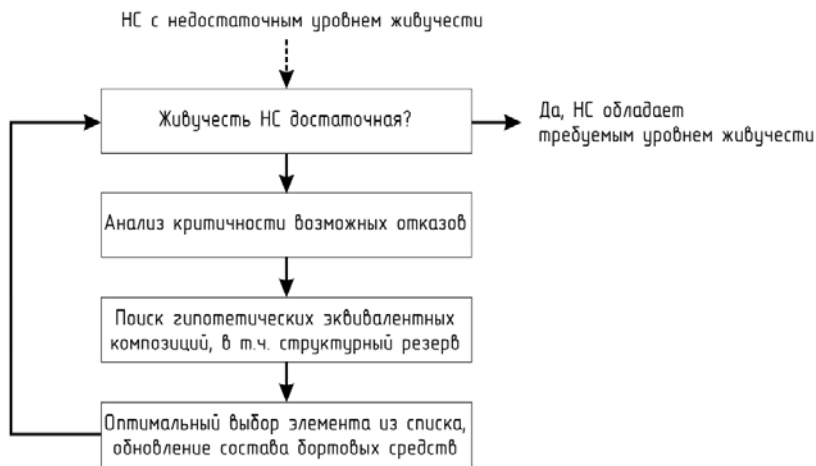


Рисунок 4 - Последовательность синтеза состава НСП

На каждой итерации сначала проводится анализ последствий от отказа каждого из элементов НСП. Отказы, приводящие к невозможности выполнения обеспечивающей задачи НСП, являются критическими. Вероятность наступления таких отказов определяет критичность используемого элемента  $R_j$ .

Из выражений (2) и (3) следует, что для увеличения количественного показателя живучести следует снижать критичность элементов НСП. Поэтому с целью достижения заданного уровня живучести  $G_p$  избыточность следует вводить прежде всего для элементов, имеющих максимальную критичность.

На каждой итерации для элементов  $s_j$  вычисляется значение комплексного критерия  $J_j$ , отражающего основные свойства элемента  $s_j$ ,

$$J_j = \frac{R_j}{m_j \cdot v_j \cdot c_j}, \quad (10)$$

производится функциональное резервирование соответствующего элемента НСП, имеющего наибольшее значение критерия до достижения заданного уровня живучести.

Тогда задача синтеза состава НСП может быть решена с учётом принятых ограничений и с использованием **минимаксного критерия**:

$$\hat{J}_j = \min_{c_j} \max_{j=1 \dots N} J_j \quad (11)$$

В третьей главе рассмотрены возможности по управлению функционированием НСП с учётом избыточности её элементов. Предложена концепция построения программно-аппаратного комплекса по управлению живучестью на этапе орбитального полёта НСП.

Для обеспечения живучести НСП на этапе орбитального полёта модель расширяется: вводится множество алгоритмов  $F$ , описывающее область следствий работы программно-аппаратного базиса  $S$ . Множество  $F$  описывает функциональность НСП – выполнение функций в рамках решения целевой задачи. Поведение системы описывается элементами языка  $F^*$ , тогда для выполнения любого алгоритма (функции НСП)  $f_i \in F$  в системе определяется  $\varphi_i \in F^*$  **функциональное соответствие – способ реализации** (вычисления) функции  $f_i$ , который характеризуется композицией задействованных физических элементов НСП  $\delta_i = \{s_1, s_2, \dots\}$ .

источников электроэнергии, установленных на НС, окажется достаточной для обеспечения работы всех элементов НСП. При расчёте общей стоимости НСП не принимаются во внимание затраты на элементы конструкции и сопряжения отдельных модулей.

Выбор состава НСП производится **последовательным итерационным добавлением** элементов в её состав (рисунок 4).

Каждый физический элемент НСП  $s_j$  реализует элементарную функцию  $\phi_j$ . Механизм реализации алгоритма  $f_i$  с использованием набора (композиции) элементов НСП  $\delta_i \in \Pi_S$  определяется выражением:

$$\delta_i \sim \varphi_i = \{\phi_1, \phi_2, \dots\}. \quad (12)$$

При построении НС из коммерческих комплектующих по модульному принципу в системе, как правило, возникает **функциональная избыточность**, при которой некоторый алгоритм  $f_i$  выполняется (реализуется)  $k_i$  способами. Тогда совокупность реализаций (выполнения) алгоритма  $f_i$  представляется  $\{\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \dots, \varphi_{ik_i}\}$ , где  $\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \dots, \varphi_{ik_i}$  – эквивалентные функциональные соответствия, представляющие собой класс эквивалентности  $\Psi_i \in F^*$ .

При отказе того или иного элемента НСП восстановление отказавших функций возможно **методом эмуляции**, что позволяет использовать функциональную избыточность в процессах реконфигурации НСП.

Выполняется анализ перечня функций и алгоритмов  $F^X \subset F$ , в реализации которых задействован отказавший элемент  $S^X$ . Для каждой из выявленных функций выбирается **эквивалентное функциональное соответствие** (байпас), не использующее отказавший элемент НСП:

$$f_i \sim \{\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{ik_i}\}, S^X \in \delta_{i1} \rightarrow f_i' \sim \{\delta_{i2}, \dots, \delta_{ik_i}\}, S^X \notin \delta_{ij}, j=2,3,\dots,k \quad (13)$$

Совокупность возможных байпасов для реализации функции  $f_i$  представляется множеством  $\Delta_i$ . В случае наличия более двух композиций  $\delta_{ij} \in \Delta_i$  для реализации функции  $f_i$  возникает неопределённость приоритетного выбора эквивалентной композиции.

Так как выбор байпаса приведёт к изменению эффективности функционирования НСП  $E$ , а также влияет на общее энергопотребление  $W$ , то выполняется оптимизация

$$\min_{W_\alpha} \min_{\alpha \in \Delta'} \{E - E_\alpha, W_\alpha\},$$

где  $\Delta'$  – упорядоченный перечень эквивалентных композиций,  $E$  – значение эффективности функционирования НСП до отказа,  $E_\alpha$ ,  $W_\alpha$  – соответственно значение эффективности функционирования НС и общее энергопотребление при выборе байпаса  $\alpha$  из упорядоченного перечня эквивалентных композиций.

В результате минимизации по первому критерию достигается минимальное снижение эффективности функционирования НСП при парировании отказа. В случае если несколько композиций позволяют достигнуть одинаковой эффективности функционирования, выбирается байпас с меньшим значением потребляемой электрической мощности.

Таким образом, для каждого алгоритма  $f_i \in F$  набор байпасов  $\Delta_i$  **оптимально упорядочивается**. В первоначальный момент времени алгоритм реализуется согласно первой комбинации. При возникновении отказа в элементах НСП этой комбинации достаточно выбрать следующую комбинацию из перечня. С целью оптимизации размера программ бортового компьютера реализацию перехода к эквивалентной композиции отказавшей функции следует выполнять внутри процедуры программного кода. При необходимости здесь осуществляется согласование входных и выходных параметров эквивалентных алгоритмов.

## Алгоритм реконфигурации функциональной схемы НСП, выполняющий

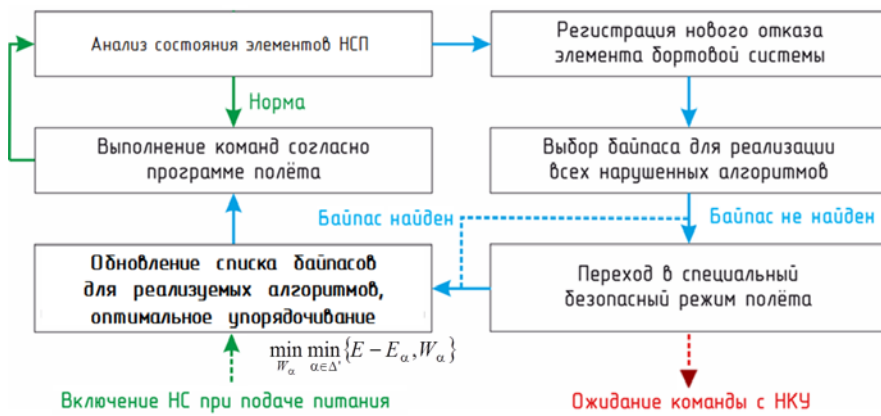


Рисунок 5 – Алгоритм управления живучестью НСП на этапе орбитального полёта

оптимальную эмуляцию отсутствующего алгоритма НСП после нештатной ситуации, представлен на рисунке 5. В начальный момент времени при включении НСП, а также периодически при выполнении команд, согласно программе полёта, производится анализ состояния всех элементов НСП.

В силу ограниченности возможностей бортового компьютера НСП используется единый подход к анализу состояния элементов НСП, согласно обобщённым условиям регистрации отказа: выход измеряемого параметра за пределы установленного диапазона, значение параметра не изменяется длительное время, нет признаков выполнения отправленной команды, нет признаков выполнения функции элемента НСП. При анализе состояния элемента НСП  $s_j$  для определения его отказа достаточно проверить выполнение условия, используя параметр  $x$  (характеристику, определяющую возникновение нештатного функционирования):

$$s_j(x) : ((x = const) \& (t \geq T_{MAX})) \vee x \notin (x_{MIN}; x_{MAX}) \quad (14)$$

При выявлении отклонения значения числового параметра  $x$  от нормы, происходит регистрация отказа в системном журнале событий. Все композиции, в составе которых присутствует отказавший элемент НСП  $s_i$ , маркируются специальным флагом «отказ» для исключения их дальнейшего использования.

Согласно перечню байпасов  $\Delta_i$ , составленных для каждого алгоритма, определяются те из них, которые оказались нарушенными в результате отказа элемента НСП  $s_j$ . Для каждого нарушенного алгоритма производится выбор следующей эквивалентной композиции, соответствующей максимально возможной эффективности функционирования НС.

При успешном парировании отказа происходит заблаговременная подготовка к парированию других возможных отказов. Изменение конфигурации НСП влечёт необходимость актуализации перечней доступных эквивалентных композиций.

Реализация алгоритма управления живучестью НС зависит от вычислительной мощности бортовых средств. Если вычислительные возможности бортового компьютера малы, то для управления живучестью в состав НСП включается специализированная система поддержания живучести НС. Такая система взаимодействует со всеми элементами, осуществляет диагностику их работы, управляет работой элементов, оптимизируя эффективность решения целевых задач. Обнаружение отказа элемента НСП должно сопровождаться «защитной реакцией», заключающейся в исключении неисправного элемента из работы.

При наличии достаточных ресурсов возможна реализация автоматического определения оптимального варианта реконфигурации НСП. Если бортовой компьютер не может рассчитать оптимальный вариант реконфигурации, он переходит к комплексному режиму работы совместно с наземным комплексом управления (НКУ).

В **четвёртой главе** рассмотрено применение описанных методик при формировании состава НСП, и предложены конфигурации НСП.

В качестве примера применения методики синтеза состава НСП рассмотрены случаи проектирования НСП для наноспутника формата CubeSat 3U, совершающего как ориентированный, так и неориентированный полёт с заданным уровнем показателя живучести не ниже 0,9. В процессе синтеза состава НСП выполнены 4 итерации наращивания базовой НСП, в результате которых был добавлен контакт отделения, реализована программная возможность работы по заранее заложенной программе полёта, добавлены запоминающее устройство и передатчик низковысотной спутниковой системы связи. В бортовом компьютере программно реализуется алгоритм управления живучестью НС, который описывает использование конкретных байпасов.

Иллюстрация применения математической модели оценки живучести выполнена на наноспутниках семейства SamSat, разработанных в 2014-2022 годах в Самарском университете. НС SamSat-218D относится к стандарту CubeSat 3U. При создании НС Samsat-218D использовалась базовая конфигурация НСП версии v.1.0, в которой не предполагалось введение дополнительных систем и не предусматривались байпасы. Полученное значение количественного показателя живучести  $G=0,57$  оказалось не высоким.

При реализации второго наноспутника SamSat-QB50 использовалась та же платформа, однако были добавлены навигационный приёмник, активные устройства стабилизации, бортовой компьютер. Живучесть НС составила  $G=0,82$ , её увеличение обусловлено образованием байпасов с использованием добавленных элементов НСП.

Были сформулированы рекомендации по повышению живучести: выполнить аппаратное и программное резервирование элементов, реализующих передачу информации по радиоканалу, хранение телеметрической информации, преобразование электроэнергии. На основе накопленного опыта разработана вторая версия НСП v.2.0.

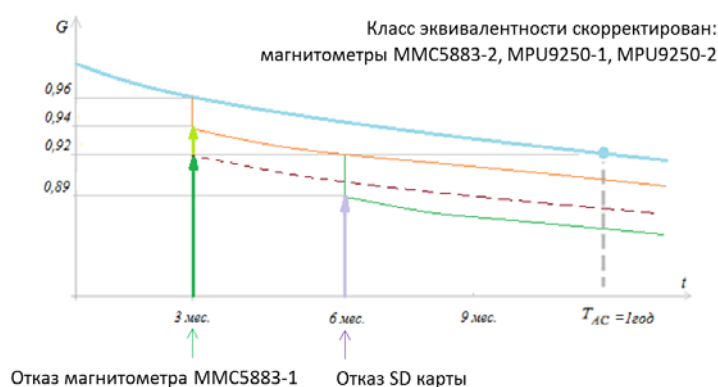


Рисунок 6 - Иллюстрация управления живучестью во время орбитального полета

С учётом подходов, описанных в диссертационной работе, в Самарском университете разработан проект НС SamSat-ION, количественная оценка живучести которого составила  $G=0,92$ . Таким образом, по сравнению с Samsat-QB50 показатель живучести увеличен более, чем на 10%.

На примере SamSat-ION рассмотрен случай управления живучестью при последовательных отказах магнитометра, SD карты (рисунок 6). При наступлении отказа

выбирается байпас, обеспечивающий наибольшую эффективность дальнейшего функционирования, оценка живучести рассчитывается заново.

В **заключении** сформулированы основные результаты исследований:

1. Представлена концептуальная теоретико-множественная модель НСП, собранной по модульному принципу из коммерческих комплектующих общего назначения.
2. Разработана математическая модель расчёта показателя живучести НСП, основанная на оценке эффективности её функционирования.
3. Разработана методика структурно-параметрического синтеза состава НСП для обеспечения заданной живучести.
4. Разработана методика реконфигурации функциональной схемы НСП путём эмуляции отказавших функций с выбором оптимального байпаса.
5. Предложен алгоритм оптимальной реконфигурации функциональной схемы НСП на этапе орбитального полёта с целью управления живучестью НСП в процессе операционной деятельности.



**Основное содержание работы опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК рецензируемых научных изданий Российской Федерации:**

1. Егоров, А.М. Анализ возможных отказов типового наноспутника / А.М. Егоров // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – №9. – С. 471-476.
2. Егоров, А.М. Выбор состава бортовых средств для обеспечения заданной живучести наноспутника / А.М. Егоров, И.В. Белоконов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – №3. – С. 78 – 86.
3. Егоров А.М. Проблема живучести наноспутника и её обеспечение за счёт использования функциональной избыточности / А.М. Егоров, И.В. Белоконов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 8. – С. 287-298.

**В других изданиях:**

4. Egorov, A. SSAU Nanosatellite Project for the Navigation and Control Technologies Demonstration / Kirillin A., Belokonov I., Timbai I., Kramlikh A., Melnik M., Ustiugov E., Egorov A., Shafran S. // Procedia Engineering. 3rd IAA-RACTs Conf. on Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites, SPEXP 2014. – 2015. – Vol. 104. – P. 97-106.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022610797 Российская Федерация. Расчёт живучести наноспутника / А. М. Егоров; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет). – № 2022610136; заявл. 11.01.2022; опубл. 17.01.2022. – 1 с.
6. Егоров, А.М. Разработка малоразмерного космического аппарата с заданной живучестью / А.М. Егоров, А.М. Богатырёв // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы ракетно-космической техники. V Козловские чтения». – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – Т.2. – С. 409-411.
7. Егоров, А.М. Выявление уязвимых элементов системы на примере наноспутника / А.М. Егоров // Сборник статей VII международной заочной научно-технической конференции ITRT-2017. – Тольятти: Изд-во ПБГУС, 2017. – С. 211-213.
8. Егоров, А.М. Оценка живучести наноспутника на примере SamSat-218D / А.М. Егоров // Сборник статей VI международной заочной научно-технической конференции «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. (ITRT-2016)». – Тольятти: Изд-во ПБГУС, 2016. – С. 190-194.
9. Егоров, А.М. Подход к построению отказоустойчивой бортовой системы управления наноспутником / А.М. Егоров, А.М. Богатырёв // Сборник материалов конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (IV Козловские чтения). – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. – Т.1. С. 443-446.
10. Егоров, А.М. Перспективная отказоустойчивая бортовая система управления типовым наноспутником / А.М. Егоров // Труды Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии». – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. – Т.2. – С. 345-347.
11. Егоров, А.М. Анализ путей обеспечения живучести наноспутника / А.М. Егоров // Сборник тезисов докладов XVII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. – С. 112-113.
12. Егоров, А.М. Обеспечение живучести наноспутников / А.М. Егоров // Сборник статей IV международной заочной научно-технической конференции «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. (ITRT-2014)». – Тольятти: Изд-во ПБГУС, 2014. – С. 118-121.